

LED 标准具结构对差分吸收光谱系统探测 NO₂ 的影响及去除方法研究

凌六一^{1,2} 谢品华¹ 秦 敏¹ 王 界¹ 司福祺¹ 李 昂¹ 胡仁志¹ 叶丛雷¹ 刘建国¹ 刘文清¹

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所国家环境光学监测仪器工程技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

² 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要 发光二极管(LED)作为一种新型光源,应用于差分吸收光谱技术(DOAS)中具有较大潜力。但一些 LED 灯谱中的法布里-珀罗标准具结构影响 DOAS 的反演。分析了一种蓝光 LED(Luxeon, LXHL-LR3C)灯谱中出现标准具结构的原因,研究了这些结构与入射角度之间的关系。通过改变 LED 的入射角度,可以使 LED 灯谱变得平滑,达到去除 LED 标准具结构的目的。在长光程 DOAS 上进行了四种不同入射角度下测量大气 NO₂ 的实验,并与传统的氙弧灯长光程 DOAS 测量结果进行了比较。结果显示,当 LED 倾斜 30°入射时,两者的测量结果有很好的一致性,系统的探测极限也只有正入射时的 13%左右。说明只要选择合适的入射角度,使 LED 谱平滑,就可以有效去除 LED 标准具结构对 DOAS 反演的影响。

关键词 大气光学;差分吸收光谱技术;光谱结构扣除;发光二极管;法布里-珀罗标准具

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1230003

Research on the Influence of Etalon Structures of LED on Differential Optical Absorption Spectroscopy System for Measuring NO₂ and Its Removing Methods

Ling Liuyi^{1,2} Xie Pinhua¹ Qin Min¹ Wang Jie¹ Si Fuqi¹ Li Ang¹
Hu Renzhi¹ Ye Conglei¹ Liu Jianguo¹ Liu Wenqing¹

¹ National Engineering Research Center for Environmental Optical Monitoring Instrument,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei, Anhui 230031, China

² Institute of Electric and Information Technology, Anhui University of Science and Technology,
Huainan, Anhui 232001, China

Abstract Light-emitting diode (LED) is a promising new type of light source for differential optical absorption spectroscopy (DOAS). Fabry-Perot etalon structures in the emission spectrum of some LED, however, influence DOAS retrievals. The cause of emergence of these structures in a blue LED (Luxeon, LXHL-LR3C) and the relation between them and the angle of incidence are analyzed. The emission spectrum of LED may become smooth by tilting the LED in the fiber coupling so as to remove the etalon structures. Long-path DOAS measurements on atmospheric NO₂ are carried out with the LED with four different angles of incidence and the measurement results are compared with these of conventional long-path DOAS with an arc lamp. The results show that NO₂ concentrations are in very good agreement with one another when tilting angle is 30°. The detection limit of long-path DOAS measurements with the LED is only about 13% of that without tilting LED. These prove that if selected angle of incidence is so appropriate that the spectrum of LED becomes smooth, the influence of etalon structures of LED on DOAS retrievals can be effectively removed.

Key words atmospheric optics; differential optical absorption spectroscopy; removal of spectral structures; light-emitting diode; Fabry-Perot etalon

OCIS codes 300.1030; 300.6550; 300.6470

收稿日期: 2011-06-21; 收到修改稿日期: 2011-07-26

基金项目: 国家 863 计划(2009AA063006)和国家自然科学基金青年科学基金项目(60808034, 40905010)资助课题。

作者简介: 凌六一(1980—),男,博士研究生,主要从事环境光谱探测技术方面的研究。E-mail: lyling@aiofm.ac.cn

导师简介: 谢品华(1968—),女,博士,研究员,主要从事环境光谱探测技术等方面的研究。E-mail: phxie@aiofm.ac.cn

(通信联系人)

1 引 言

差分吸收光谱(DOAS)技术最初由 Platt 等^[1]在 20 世纪 80 年代提出,目前已成为大气污染监测的常用方法之一。它具有监测范围广、响应速度快、无接触测量以及可实现多组份同时在线监测等特点,在对流层痕量气体监测中有着广泛应用^[2~7]。DOAS 技术是利用大气中气体分子的窄带吸收特性来鉴别气体成份,并根据窄带吸收强度来反演微量气体的浓度,其定量关系可由 Lambert-Beer 定律给出。根据采用光源的不同,可分为主动 DOAS 和被动 DOAS。被动 DOAS 以自然光为光源,太阳光、月光和星光均可作为被动 DOAS 的光源;主动 DOAS 则利用人工光源作光源,目前主要是氙弧灯和氙灯等。

与氙弧灯相比,发光二极管(LED)具有体积小、寿命长、安全可靠、价格低和节能环保等优势。近年来,随着 LED 技术的发展和不断改进,不仅可见光谱波段的 LED 发光效率变得更高,紫外波段的 LED 也实现商品化,采用 LED 作为主动 DOAS 系统的光源已成为可能^[8~10]。然而,LED 光源也有不足之处,LED 灯谱会随温度的变化而产生漂移^[11],光谱的漂移直接影响 DOAS 的反演结果。若将含有标准具结构的 LED 作为 DOAS 系统光源,当 LED 温度波动时,还要考虑标准具结构对 DOAS 反演的影响。Kern 等^[9,10]用有标准具结构的蓝光 LED(Luxeon LXHL-LR3C)作为长程 DOAS 系统的光源,测量了大气中的痕量气体 NO₂。他们在 DOAS 反演时,采用了两条合成参考谱,一条用于描述 LED 谱中标准具结构的漂移,另一条用于描述 LED 谱中恒定的标准具结构。拟合时,结合这两个参考谱可以很好地从测量谱中扣除 LED 谱的标准具结构。然而,这种方法的扣除效果取决于 LED 谱标准具结构随时间变化的稳定性。通常,有两种方法可以保证这种稳定性,一种是对 LED 光源实现高精度的恒温控制,通常要求 LED 温度波动在 0.1 K,甚至在 0.01 K^[12],如此高精度的恒温控制实现起来非常困难,这无疑增加了 DOAS 系统的复杂性。另一种方法是每测量一次大气谱之后紧接着测量灯谱,这样每次拟合时,以刚测得的灯谱来构造合成参考谱,但这种方法牺牲了 DOAS 系统的时间分辨率。

本文从 LED 入射角度考虑,研究了 LXHL-LR3C 标准具结构随入射角度的变化规律,发现只要选择合适的入射角度,可得到非常平滑的 LED

谱,这样就可以使长光程 DOAS 系统测得的 LED 灯谱和大气谱中含有极少甚至没有标准具结构。通过调整 LED 光源入射角度,从源头去除 LED 谱的标准具结构,这种方法既不要求光源温度的高精度控制,也不需要反复测量灯谱。同时,采用这种方法去除 LED 标准具结构后,在后续 DOAS 反演过程中不需要添加任何的合成参考谱,改善了反演效果。通过对大气 NO₂ 的监测结果验证了此方法的可行性。

2 LXHL-LR3C 谱的形状与结构

LXHL-LR3C 谱的形状如图 1 所示,谱中出现了一些周期性的结构,这些结构归因于 LED 自身的法布里-珀罗标准具效应。法布里-珀罗标准具效应是一种干涉现象,任何时候光穿过不同折射率的平行层时,这种现象都会出现。穿过光在平行层之间来回反射,形成多个平行的反射光和多个平行的透射光,相邻光的相位差都相等,这样就构成了多束相干光,也就导致了 LED 谱中出现的周期性标准具结构。对于给定的层,若厚度为 d ,折射率为 n_2 ,层所处的介质折射率为 n_1 ,则在光入射方向出现干涉光的波长为^[9]

$$\lambda_N = \frac{2dn_2}{N \sqrt{1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \gamma}}, \quad (1)$$

式中 N 为序号, γ 为光入射角度。

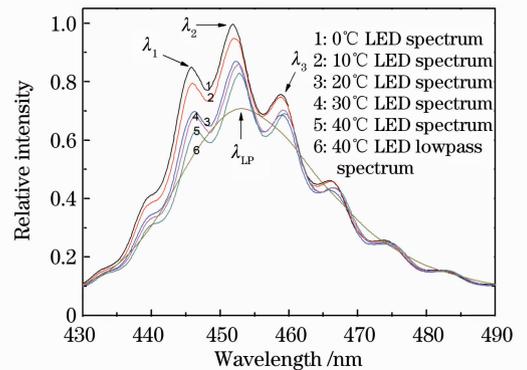


图 1 不同温度下的 LXHL-LR3C 谱的形状
Fig. 1 Spectra of LXHL-LR3C under different temperatures

众所周知,光学密度 $D_0 = \ln(I/I_0)$,其中 I_0 是灯谱; I 是经过介质后的吸收谱。从原理上讲,即使灯谱的形状呈现标准具结构,但这并不影响 DOAS 的测量,因为 I 与 I_0 相除抵消了谱中的这些结构。然而,由于某种原因使光谱发生了漂移,导致 I 与 I_0 形

状并不完全一致,此时得到的光学密度 D_o 中就会出现一些周期性的结构,因而会影响到 DOAS 的测量结果。导致光谱发生漂移的诸多原因中,温度波动所造成的影响最为明显^[11]。实际上,对 LXHL-LR3C 来说,(1)式中的参数 d, n_1, n_2 都是温度的函数,即出现干涉的光谱位置与温度相关,一旦温度出现波动,标准具的峰值波长就会漂移。

为了解 LXHL-LR3C 谱的温漂情况,设计了一个 LED 恒温控制系统,其结构示意图如图 2 所示,该系统可实现 LXHL-LR3C 在 0 °C ~ 50 °C 范围内的温度恒定。图 1 是温度为 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C 和 40 °C 时的 LXHL-LR3C 谱。从图 1 可以看出,标准具效应引起的中心三个峰的波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 发生了漂移。温度升高,波长会向长波方向漂移,通过计算发现温度每增加 10 °C, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 三个峰值波长平均漂移 0.19, 0.24 和 0.16 nm, 三个发射峰的平均温漂为 +0.019 nm/K。将所测灯谱经多项式低通滤波后(图 2 中的谱 6 是 40 °C 时的低通谱示例),发现峰值波长 λ_{LP} 的平均温漂为 +0.04 nm/K。

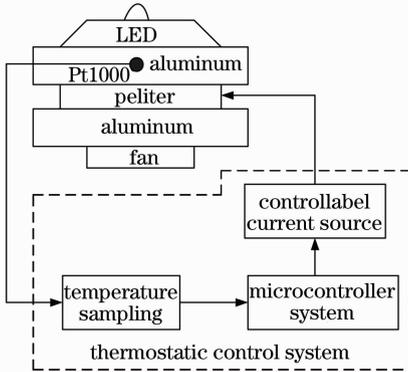


图 2 LED 恒温控制系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of LED temperature control system

研究发现^[12],若要获得 0.001 以下的差分光学密度, LXHL-LR3C 谱的漂移程度必须小于 0.01 nm, 即对应的温度波动应在 0.25 K 以下。因此,为了获取较低的系统探测限,在 DOAS 测量过程中,LED 光源通常都采取恒温控制。然而在实际测量中发现,即使 LXHL-LR3C 温度稳定性很好,DOAS 系统可探测的最小差分光学密度仍然较高,主要原因是 LXHL-LR3C 标准具结构对入射角度的变化较为敏感。也就是说, LXHL-LR3C 入射角度的稳定性是获得较小差分光学密度的另一个重要因素。如果 LED 谱标准具结构少或谱比较平滑,此时就可以降低对 LED 温度和入射角度的稳定性要求。

3 LXHL-LR3C 标准具结构的去除

从(1)式可以看出,不同的探测角度可能会得到不同形状的灯谱。为此,搭建了灯谱测量平台。如图 3(a)所示,将 LXHL-LR3C 安装在一个可旋转的光学座上,旋转轴平行于且紧靠 LED 发光表面,距离 LXHL-LR3C 表面 120 mm 处有一焦距为 60 mm 的透镜,透镜的另一侧放置一根多模光纤(直径 $\phi = 400 \mu\text{m}$, 数值孔径 NA 为 0.22), 光纤端面放置在离透镜 120 mm 处,光纤的另一端与光谱仪(Ocean Optics, Maya2000Pro)相连。

开始测量时, LXHL-LR3C 正对透镜,即 $\theta = 0^\circ$, 然后逐渐增加旋转角度。 LXHL-LR3C 每旋转 5° , 就测量一次灯谱,最终得到不同 θ 下的 LED 灯谱。图 3(b)给出了 $\theta = 0^\circ, 50^\circ$ 和 75° 时的 LED 灯谱,从谱的形状可以看出: $\theta = 0^\circ$ 时, LED 灯谱具有明显的标准具结构,而当 θ 增加到 50° 时, LED 灯谱看不出有这种结构,谱显得非常平滑。随着旋转角度的进一步增加,标准具结构又慢慢凸显出来。不同入射角

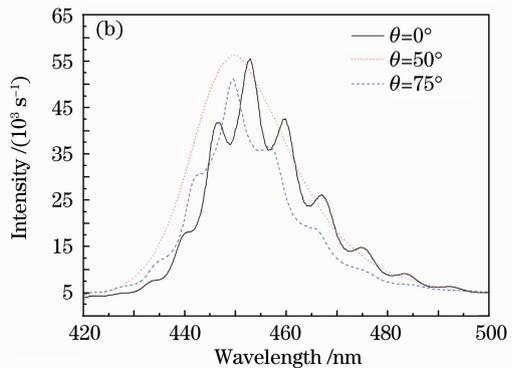
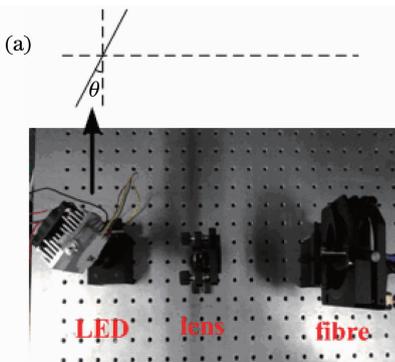


图 3 (a) LXHL-LR3C 灯谱测量平台; (b) 三种入射角度下的 LXHL-LR3C 灯谱的形状

Fig. 3 (a) Platform for measuring the spectra of LXHL-LR3C; (b) LXHL-LR3C spectra with three different incident angles

度谱的形状发生很大变化,造成这种情况的主要原因是在 LED 内部产生干涉所需的条件发生了变化。当 LED 正入射时,光在平行层之间来回反射,比较容易满足相邻光相位差相等条件,所以谱中的标准具结构比较明显,随着入射角度的改变,相邻光相位差相等这个条件被破坏,在一定的入射角度下,没有干涉产生,所以 LED 谱就显得很平滑。

为了定量描述入射角度对 LED 灯谱标准具结构的影响,在此引入“光强调制 M ”^[12] 这个观测量, M 的获取过程为:将测量得到的 LED 灯谱经多项式高通滤波器(1000 次迭代)去除宽带结构,再经低通滤波器(2 次迭代)滤除噪声,然后在原始灯谱半峰全宽(FWHM)波段范围内,计算滤波灯谱的峰-峰值,即为 M 。由于经滤波后的 LED 谱只包含了灯谱的标准具结构,所以 M 的大小可以很好地描述 LED 谱中包含标准具结构的程度。图 4 给出了 LXHL-LR3C 的光强调制系数 M 随角度的变化情况。LED 正入射时, M 具有较大的值(32.4%),随着旋转角度 θ 的增加, M 逐渐减小,在 $\theta=55^\circ$ 时 M 达到最低值(10.5%)。随后, θ 与 M 保持相同的变化趋势。

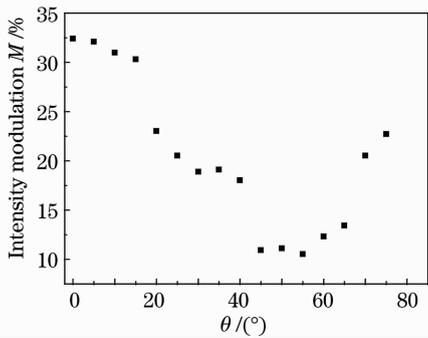


图 4 LXHL-LR3C 的光强调制系数 M 与入射角度 θ 之间的关系

Fig. 4 Relation between light-intensity modulation M of LXHL-LR3C and incident angle θ

DOAS 反演之后的残差(剩余噪声)是反映系统测量结果可信度的一个重要因素^[13],系统剩余噪声可近似通过连续测量的两条灯谱相除后得到^[14]。在相同的温度控制条件下(LED 温度波动在 0.5 K 左右),对 LXHL-LR3C 灯谱长时间观测发现:当环境温度相对稳定时,剩余噪声与 M 值的大小关系不大。然而,当环境温度的变化使 LXHL-LR3C 温度发生一定波动时,剩余噪声与 M 值之间呈现正相关关系。可以想象,如果 LED 灯谱不平滑,谱中有多个波峰,一旦温度出现波动(即使是很小的波动),温

度漂移前后的两条灯谱的多个波峰就会不一致,这样两条灯谱相除后会出现类似于正弦的结构,将会严重干扰 DOAS 的反演。因此,如果 LXHL-LR3C 的温度控制精度有限,它的 M 值越小,其标准具结构对 DOAS 反演的干扰就会越小。

从图 3(b)和图 4 可以看出,只要选择合适的 LXHL-LR3C 入射角度,DOAS 测量时就可以得到较为平滑的 LED 谱,相应的 M 值也很小。通过调整 LED 入射角度,从源头上就可以很好地扣除 LED 谱的标准具结构,从某种意义上讲,此时的 LXHL-LR3C 相当于没有标准具结构的 LED,这样在后续 DOAS 反演过程中就不需要添加任何的合成参考谱,提高了反演结果的可信度。

4 LED-DOAS 测大气 NO_2 实验

4.1 LED-DOAS 系统

图 5 是 LED-DOAS 系统的结构示意图,主要包括 LED 光源、收发一体望远镜、角反射器、光纤、光谱仪、探测器和计算机等。LED 光源 LXHL-LR3C 的中心波长约 450 nm,半峰全宽约 20 nm,它被安装在一个铝散热片上,散热片的温度稳定度为 ± 0.5 K。光谱仪采用的是 Maya2000PRO,通过其 USB 接口与计算机相连。如图 5 所示,LED 发出的光经 45° 反射镜反射到望远镜中的主镜上,经主镜准直为平行光后射向远处的角反射镜,从角反射镜反射回来的光被主镜会聚,经次镜再次反射,最后聚集到光纤的入射端面。光通过光纤耦合到光谱仪的入射狭缝,经光谱仪分光后照射到 CCD 感光面上,CCD 探测器通过 USB 接口将转换后的光谱数据输出给计算机,供其分析处理。LED-DOAS 望远镜放置在中科院安徽光机所主实验楼的六层,距离地面 18 m,

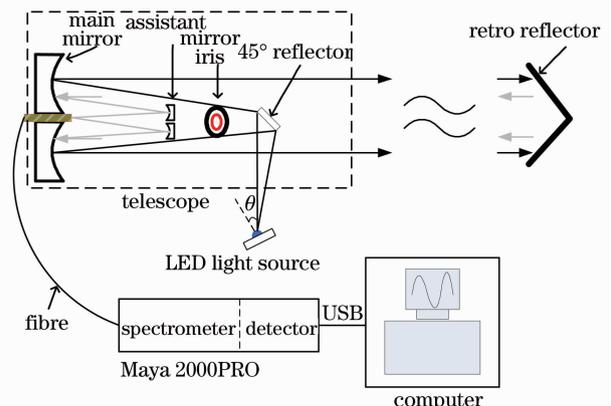


图 5 LED-DOAS 系统结构示意图

Fig. 5 Schematic of LED-DOAS system

角反射镜放在另一个建筑物上,光程为 760 m。

4.2 大气 NO₂ 测量结果

为了验证 LXHL-LR3C 入射角度对 DOAS 测量的影响,进行了 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 75° 四种入射角度下测量大气 NO₂ 的实验。每种角度进行大气谱测量之前测量一次灯谱,之后不再测量灯谱。反演时,首先每一条光谱校正探测器的偏置和暗电流,然后将校正后的大气谱和灯谱相除并取对数,得到光学密度。把文献[15]的 NO₂ 高分辨率吸收截面与仪器函数卷积得到参考截面,然后对参考截面和光学密度进行最小

二乘拟合,最终获得大气 NO₂ 的浓度。

图 6 是每种入射角度下反演 NO₂ 的一个例子,反演波段在 437~465 nm 之间。从图 6 可以看出,LXHL-LR3C 正入射,即 $\theta=0^\circ$ 时的拟合残差主要是 LED 的周期性标准具结构,它的幅度是其他三个倾斜角度时的数倍。随着 LXHL-LR3C 的倾斜,这种标准具结构明显减少,残差的幅度也急剧下降。当 LXHL-LR3C 倾斜到使测得的谱较为平滑的角度时,拟合残差的幅度很小。而当测得的谱中有明显标准具结构时,残差的幅度将大幅增加。

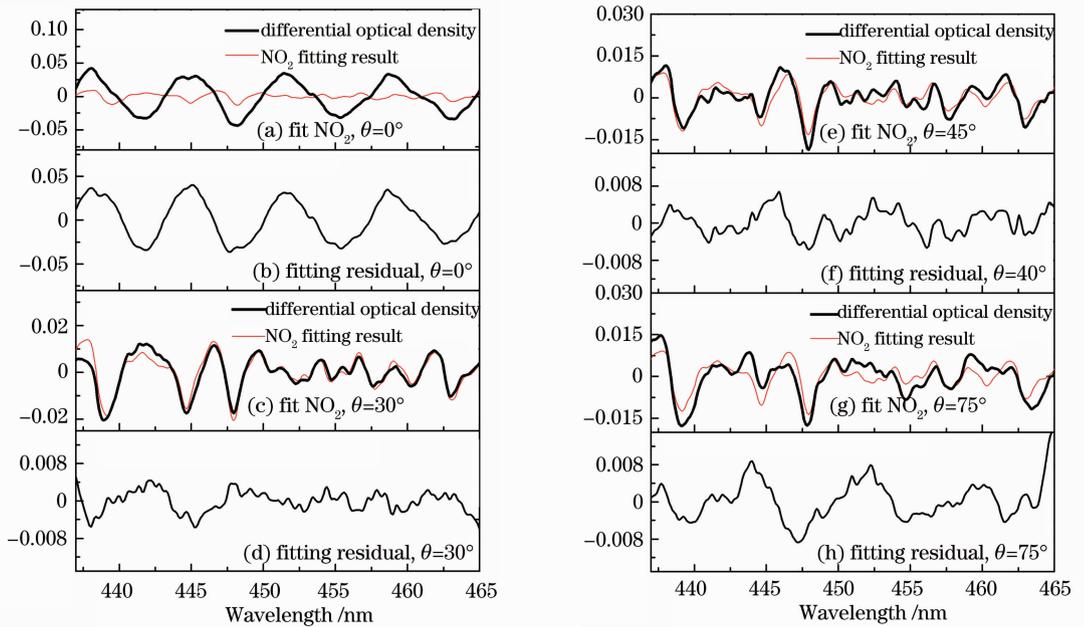


图 6 四种入射角度下 NO₂ 的反演结果 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 和 75° 时的拟合残差分别为 0.08, 0.01, 0.012 和 0.016

Fig. 6 NO₂ retrieval results with four incident angles. Fitting residuals of $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 75° are 0.08, 0.01, 0.012 and 0.016, respectively

图 7 是 2011 年 4 月 6~21 日期间 LED-DOAS 系统在四种入射角度下和氙弧灯 (150 W, Osram) 长光程 DOAS (CN-DOAS) 系统对合肥西郊科学岛大气 NO₂ 浓度的测量结果对比。其中由于测量期间 (4 月 8 日凌晨 2~10 点) 浓雾的影响,数据有部分空缺,如图 7(b) 所示。需要说明的是,CN-DOAS 系统反演 NO₂ 采用的波段为 323~376 nm,除光源以及探测器 (光电二极管阵列 PDA) 不同之外,测量系统的其他部件均与 LED-DOAS 基本一致。当入射角度 $\theta=0^\circ$ 时,LED-DOAS 对 NO₂ 浓度测量结果出现了震荡,其原因主要是 LED 的标准具结构严重干扰了正常的 DOAS 拟合。而 LED-DOAS 其他三个角度测得的 NO₂ 浓度与 CN-DOAS 的测量结果总体上保持了较好的一致性,但在 NO₂ 较低浓度值时两者一致性较差,LED-DOAS 测量结果甚至出现

了负的奇异值 [如图 7(c) 所示, $\theta=45^\circ$], 这主要是由测量系统的探测灵敏度引起的,根据文献[14],估算得到 CN-DOAS 系统的探测限为 2×10^{-9} , 而在此角度下,LED-DOAS 系统探测限为 4.3×10^{-9} 。在一致性较差的时段内,NO₂ 的平均浓度约为 5.5×10^{-9} , 接近系统探测限。

将两套 DOAS 系统的测量结果进行小时均值统计 (扣除负的奇异值), 并对统计结果进行线性拟合, 给出两者测量结果的相关性如图 8 所示。当 $\theta=0^\circ$ 时, 两者的相关性只有 0.83, 线性拟合的斜率为 1.87 ± 0.16 , LED-DOAS 平均测量结果比 CN-DOAS 偏低近 1 倍左右, 造成这种偏离的主要原因是 LED 的标准具结构引起的。而当 $\theta=30^\circ$ 时, 两者的相关性高达 0.98, 线性拟合的斜率为 1.10 ± 0.02 , 此时 LED-DOAS 与 CN-DOAS 的测量结果最

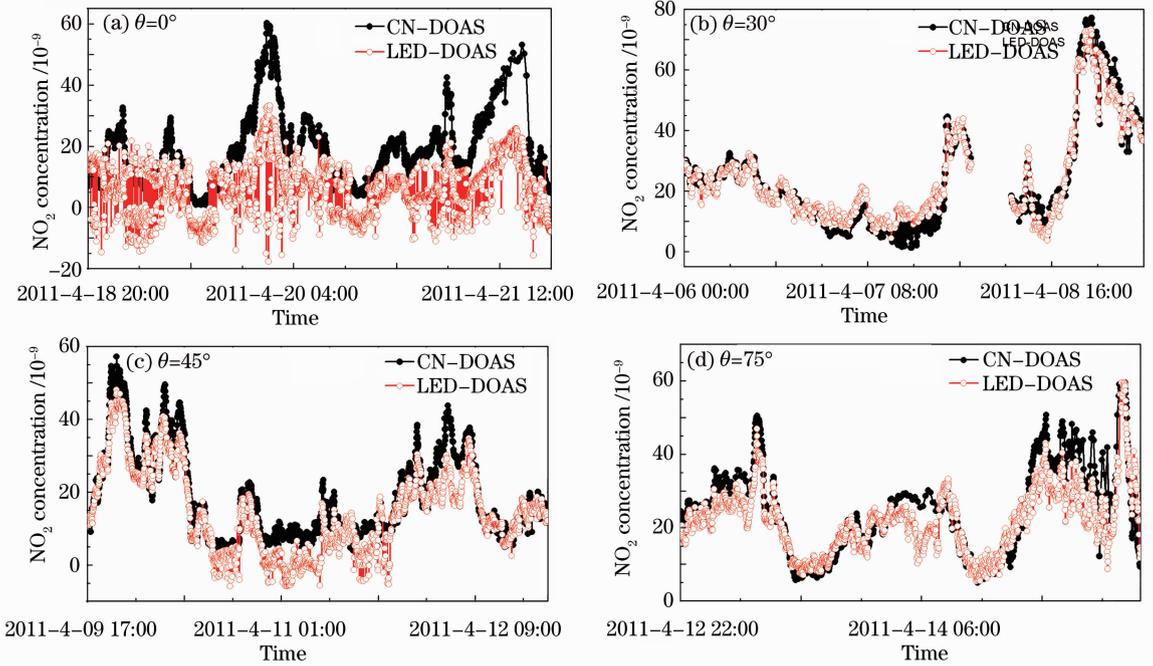


图 7 四种入射角度下的 LED-DOAS 与 CN-DOAS 监测大气 NO₂ 浓度的结果对比

Fig. 7 Comparison of the atmospheric NO₂ concentrations measured by the LED-DOAS and the CN-DOAS with four incident angles

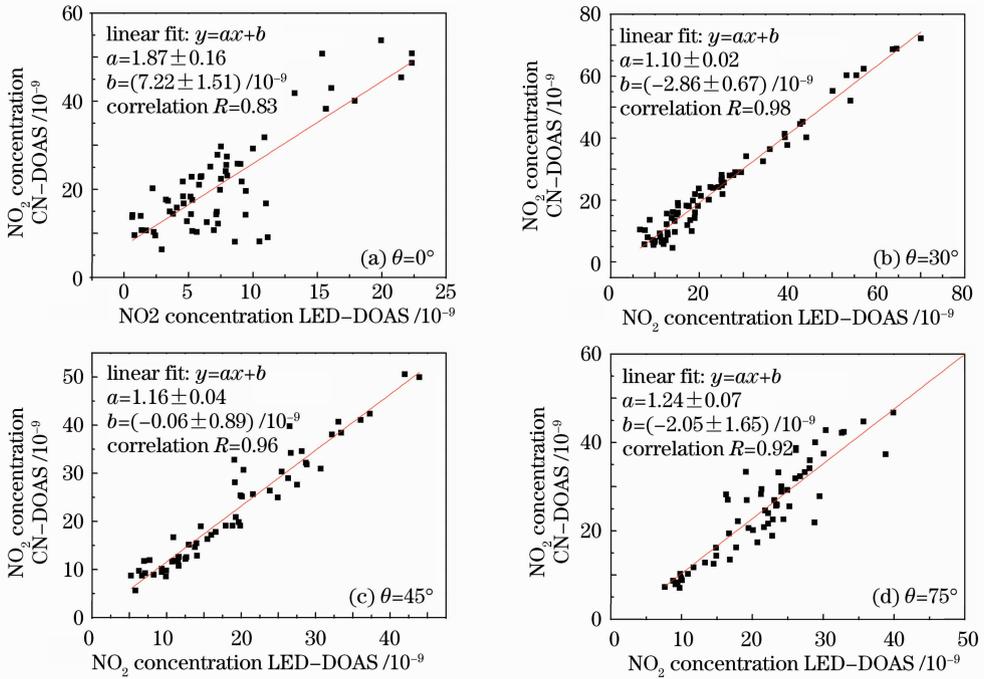


图 8 四种入射角度下的 LED-DOAS 与 CN-DOAS 监测大气 NO₂ 的相关性

Fig. 8 Correlation of the atmospheric NO₂ concentrations measured by the LED-DOAS and the CN-DOAS with four incident angles

为接近,但仍有一定的偏差,造成这种偏差的主要原因可能是:1)两者反演波段的不同^[16];2)大气与灯谱测量光路的不同影响了 LED-DOAS 的测量结果。由于 LXHL-LR3C 灯谱与测量角度有关,测量光路的差

异就有可能导致灯谱和大气谱的形状不一致,即使谱很平滑,但大气谱与灯谱相除后仍然会有一些结构,即光学密度谱中仍有一定的结构,从而干扰了 DOAS 的反演。这些结构的存在降低了 LED-DOAS 系统的

探测灵敏度,当 NO₂ 浓度出现低值时(小于 10×10^{-9}),LED-DOAS 与 CN-DOAS 的测量结果相差较大,如图 7(b)所示。对两者测量结果进行相关性分析时,若不考虑 NO₂ 浓度低值这部分,则线性拟合的斜率为 1.06 ± 0.02 ,两者的测量结果将更为接近。

5 结 论

测量大气 NO₂ 的实验结果表明,通过改变 LED 的入射角度,可以有效去除 LED 标准具结构对 DOAS 反演的影响,改善了反演效果,提高了 DOAS 测量系统的探测限。通过选择合适的 LED 入射角度并进一步提高 LED 的温度稳定性,LED-DOAS 系统可以达到与传统 DOAS 系统相同的测量效果。同时,在 NO₂ 浓度反演时,没有增加任何的合成参考谱,提高了反演结果的可信度。总之,倾斜 LED 的入射,可以使灯谱变得平滑,还降低了测量系统对 LED 温度和入射角度稳定性的要求。

参 考 文 献

- 1 U. Platt, D. Perner, H. W. Pätz. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption [J]. *J. Geophysical Research*, 1979, **84** (10): 6329~6335
- 2 Shi Peng, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Measurement of nitrate radical in the atmosphere by direct moonlight passive differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3643~3648
石 鹏,谢品华,李 昂等. 基于直射月光的差分吸收光谱技术测量大气 NO₃ 自由基 [J]. *光学学报*, 2010, **30** (12): 3643~3648
- 3 Wang Shanshan, Zhou Bin, Ye Qing *et al.*. Application of vehicle-borne passive differential optical absorption spectroscopy for urban traffic air pollution monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2645~2649
王珊珊,周 斌,叶 庆等. 车载被动差分吸收光谱在城市道路空气污染监测中的应用 [J]. *光学学报*, 2009, **29** (10): 2645~2649
- 4 Zhu Yanwu, Xie Pinhua, Douke *et al.*. Study on scanning differential optical absorption spectroscopy for monitoring vertical profiles of atmospheric pollutant [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 297~302
朱燕舞,谢品华,窦 科等. 大气污染物垂直廓线扫描差分吸收光谱方法研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 297~302
- 5 Si Fuqi, Xie Pinhua, Liu Yu *et al.*. Determination of plume by hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy

- [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2458~2462
司福祺,谢品华,刘 宇等. 超光谱成像差分吸收光谱系统烟羽测量研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2458~2462
- 6 Lin Yihui, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Measurement of CS₂ in emission plume of power plant by passive differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (6): 1450~1453
林艺辉,谢品华,李 昂等. 被动差分吸收光谱技术测量电厂烟羽中 CS₂ 的研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1450~1453
- 7 X. Pinhua, F. Qiang, L. Jianguo *et al.*. Retrieval of Monocyclic aromatic hydrocarbons with differential optical absorption spectroscopy [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2005, **26**(9): 1584~1588
- 8 Feng Xu, Zhe Lü, Xiutao Lou *et al.*. Nitrogen dioxide monitoring using a blue LED [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47** (29): 5337~5340
- 9 C. Kern, S. Trick, B. Rippel *et al.*. Applicability of light-emitting diodes as light sources for active differential optical absorption spectroscopy measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(9): 2077~2088
- 10 Li Suwen, Xie Pinhua, Liu Wenqing *et al.*. A study of applicability of light emitting diodes in differential optical absorption spectroscopy measurements [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1963~1967
李素文,谢品华,刘文清等. 发光二极管在差分吸收光谱系统中的应用研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1963~1967
- 11 G. B. Angel, A. F. Antonio, V. M. Daniel *et al.*. Thermal influences on optical properties of light-emitting diodes: a semiempirical model [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(4): 533~537
- 12 H. Sihler, C. Kern, D. Pohler *et al.*. Applying light-emitting diodes with narrowband emission features in differential spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3716~3718
- 13 J. Stutz, U. Platt. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(30): 6041~6053
- 14 Qin Min, Xie Pinhua, Liu Jianguo *et al.*. Study on UV-visible DOAS system based on photodiode array (PDA) [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2005, **25**(9): 1463~1467
秦 敏,谢品华,刘建国等. 基于二极管阵列 PDA 的紫外可见差分吸收光谱 (DOAS) 系统的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(9): 1463~1467
- 15 S. Voigt, J. Orphal, J. P. Burrows. The temperature and pressure dependence of the absorption cross sections of NO₂ in the 250~800 nm region measured by Fourier-transform spectroscopy [J]. *J. Photochem. Photobiol. A.*, 2002, **149**: 1~7
- 16 Peng Fumin, Xie Pinhua, Shao Shiyong *et al.*. Measurement and retrieval of indicators for fast VOCs atmospheric photochemistry with differential optical absorption spectroscopy [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2008, **28**(3): 507~511
彭夫敏,谢品华,邵士勇等. 差分吸收光谱法对大气中挥发性有机物光化学作用指示剂的监测与反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(3): 507~511